

## **EL PROYECTO FENIX EN LA UPC. MEZCLAS SEMICALIENTES**

Reyes-Ortiz, Oscar Javier.  
Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona-España.  
Universidad M. Nueva Granada. Bogotá-Colombia.  
[oscar.reyes@unimilitar.edu.co](mailto:oscar.reyes@unimilitar.edu.co)

Pérez-Jiménez, Félix E.  
Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona – España.  
[edmundo.perez@upc.edu](mailto:edmundo.perez@upc.edu)

Miro Recacens, Rodrigo  
Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona – España.  
[r.miro@upc.edu](mailto:r.miro@upc.edu)

Amoros Parras, Jose  
Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona – España.  
[j.amoros@upc.edu](mailto:j.amoros@upc.edu)

Gil Redondo, Santiago  
Ditecpesa. Madrid-España.  
[sgil.ditecpesa@ferrovial.es](mailto:sgil.ditecpesa@ferrovial.es)

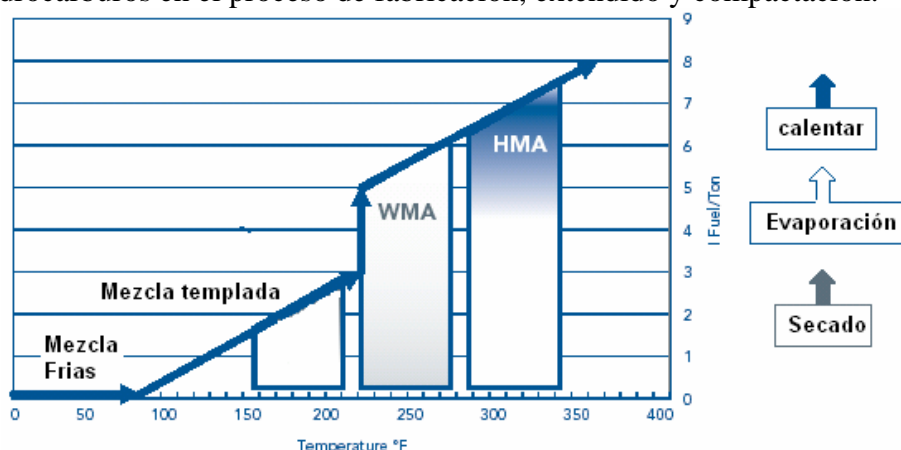
### **Resumen**

En el marco del Proyecto FENIX, financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial, y más concretamente dentro de la Tarea 7: Mezclas Semicalientes, el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, junto a la empresa Ditecpesa, realizaron un estudio comparativo del comportamiento de mezclas calientes y semicalientes con granulometría S-20 y betunes B-60/70 y modificados con ceras y tensoactivos. La temperatura de fabricación de las mezclas fue entre 110 y 155°C y su compactación se realizó mediante impacto (equipo Marshall). Para determinar las propiedades de las mezclas, se realizaron los ensayos de tracción indirecta, módulo de rigidez, fatiga y ensayo Fénix (Desarrollado recientemente por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña). Entre los resultados encontrados se observó que se puede reducir 30 o 40°C la temperatura de fabricación y compactación de la mezcla bituminosa con los betunes modificados, consiguiendo propiedades equivalentes a la mezcla caliente convencional, reduciendo significativamente la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo de energía en su fabricación.

## INTRODUCCIÓN

El protocolo de Kyoto firmado por la Unión Europea ha venido a imponer a la industria nuevos condicionamientos medioambientales, especialmente los relacionados con la emisión de los gases del efecto invernadero ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ ). Es por esto, que desde hace varios años la industria asfáltica ha desarrollado nuevos productos y procedimientos para ahorrar energía y disminuir la contaminación ambiental, los cuales han sido enfocados especialmente en la fabricación de mezclas a temperaturas inferiores a las convencionales ( $150\text{-}180^\circ\text{C}$ ).

Las mezclas semicalientes (WMA Warm Mix Asphalt), definidas como mezclas calientes capaces de ser mezcladas y compactadas a temperaturas inferiores a las convencionales, han brindado una solución a la contaminación ambiental. Entre los diferentes beneficios obtenidos se encuentra la reducción de los gases de efecto invernadero, que según estudios realizados por D'Angelo et al (2008), se puede disminuir entre un 15-40% la cantidad de  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$ , entre un 10-30% de CO y un 60-70% de  $\text{NO}_x$ . Otro beneficio obtenido es la reducción del consumo de combustible, que según Jenkins (2000), se puede ahorrar entre un 10 y 35% de gasoil (Figura 1). De otra parte, reducir la temperatura de fabricación y compactación de la mezcla caliente permite que las distancias entre la planta y la obra se incrementen. Por último, autores como Gil, S et al (2009), manifiestan una reducción entre el 30-50% de la emisión de humos e hidrocarburos en el proceso de fabricación, extendido y compactación.

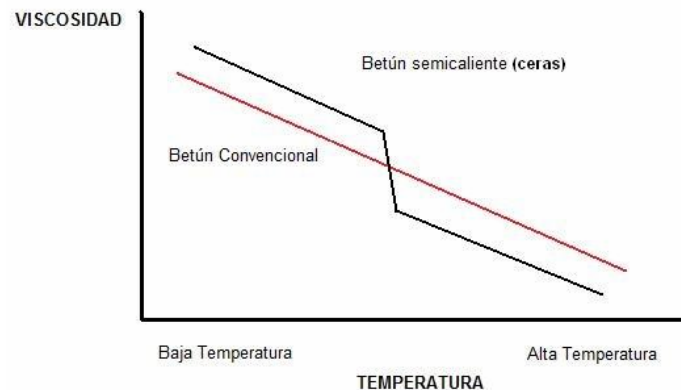


**Figura 1. Rango de temperaturas y consumo de gasoil de las mezclas asfálticas**

La fabricación de mezclas semicalientes (WMA) se puede conseguir mediante diferentes procesos, la doble envuelta, la adición de zeolitas sintéticas, la espumación del betún y la adición de ceras o parafinas, sin embargo, todos estos procesos tienen un fundamento común, disminuir la viscosidad del betún para poder fabricar, transportar y poner en obra mezclas bituminosas a temperaturas más bajas, sin perder su manejabilidad ni prestaciones. De otra parte, investigaciones hechas con productos denominados tensoactivos han demostrado iguales prestaciones que los enunciados anteriormente, solamente que se diferencian en afectar el comportamiento reológico del mástico, en especial a porcentajes entre 0,2 y 0,5%.

Bahia et al (1993) manifiestan que la mezcla idónea de un betún con árido se logra cuando la viscosidad del betún es próxima a los 180 cP (mPa s), valor que alcanza un betún convencional a los  $170^\circ\text{C}$ . Una forma de conseguir esta viscosidad es mediante la modificación reológica del betún por la adición de ciertos productos (ceras, parafinas, zeolitas), sin embargo, lo difícil es lograr reducir la viscosidad a elevadas temperaturas sin

disminuir ésta a temperaturas bajas (Figura 2), de tal modo, que no comprometa el comportamiento mecánico de la mezcla.



**Figura 2. Comportamiento de la viscosidad de un betún con la temperatura**

Los productos más conocidos y utilizados para modificar la viscosidad del betún son las ceras y parafinas (Raz et al, 2009). Las ceras, suelen ser naturales y obtenidas de residuos fósiles de plantas. Químicamente son ésteres de ácidos y alcoholes grasos de elevado peso molecular. Las parafinas, materiales sintéticos de elevado peso molecular y que se diferencian de las naturales, por tener cadenas más cortas de átomos de carbono. De otra parte, existen en el mercado otros productos que modifican la reología del mástico, entre los cuales se pueden enumerar los tensoactivos o líquidos polifuncionales de base orgánica, que actúan como hiperplastificantes. Los cristales de zeolita granular, que contiene un 21% de agua en masa y que por contacto con el betún a elevadas temperaturas, crea una espuma que le permite disminuir las temperaturas de fabricación.

Basándose en la hipótesis que modificar la viscosidad de un betún permite reducir la temperatura de fabricación y compactación de una mezcla bituminosa, el presente artículo muestra los resultados encontrados en las propiedades mecánicas de una mezcla bituminosa al modificar el betún B-60/70 con ceras y tensoactivos.

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL**

El estudio realizado para determinar el comportamiento de las propiedades de una mezcla semicaliente fabricada con betunes modificados con ceras y tensoactivos, estuvo dividida en dos etapas:

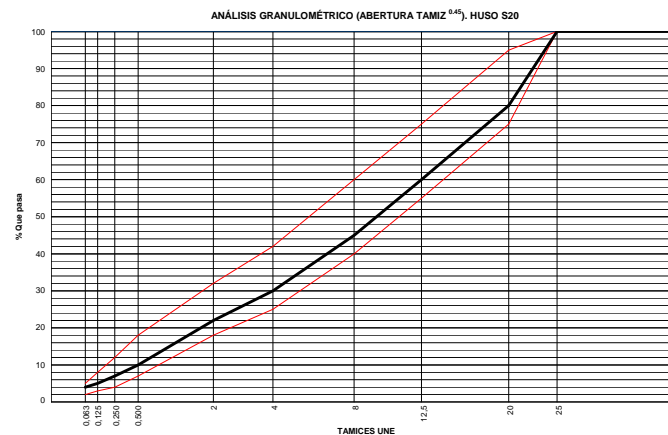
1. Determinación del porcentaje óptimo de cera y tensoactivo a adicionar al betún B-60/70 para utilizarlo en la fabricación de una mezcla semicaliente.
2. Estudiar el comportamiento de las mezclas bituminosas semicalientes fabricadas y compactadas a diferentes temperaturas con los betunes modificados (cera y tensoactivo) y el betún patrón (B-60/70).

La primera etapa, consistió en adicionar porcentajes de ceras y tensoactivos a un betún convencional B-60/70, entre 0,1 y 4%, y medir su comportamiento a la viscosidad rotacional, con el fin de establecer el porcentaje óptimo y las temperaturas a las cuales se puede mezclar y compactar de una manera adecuada.

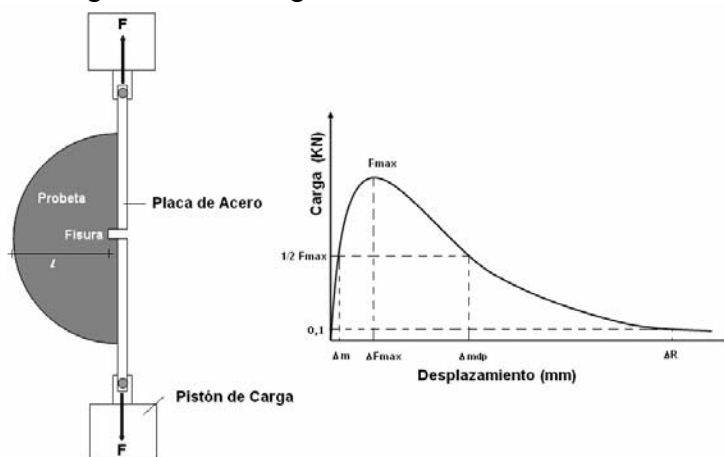
La segunda etapa, comportamiento de las mezclas semicalientes, inicio con la selección de la curva granulométrica S-20 centrada en su huso de la normativa española (Tabla 1 y Figura 2). Posteriormente, se fabricaron y compactaron muestras por impacto (equipo Marshall) a las temperaturas de 110, 120, 130 y 140°C para los betunes con adición de ceras y tensoactivos y de 120, 140 y 155°C para el betún convencional B-60/70. La última parte (ejecución de ensayos), se inició con la ejecución del ensayo Fénix desarrollado recientemente por la Universidad Politécnica de Cataluña (figura 3) (Pérez et all, 2009), el cual determinó la resistencia a la tracción directa de la mezcla a 20°C. Posteriormente, se realizaron los ensayos de compresión diametral a 15°C (Figura 4) y el módulo de rigidez a 20°C, determinando su resistencia a la tracción indirecta y su módulo resiliente. Finalmente, se ejecutaron los ensayos de fatiga en cuatro puntos de apoyo a 20°C y en mezclas fabricadas y compactadas a 130°C.

**Tabla 1. Granulometría de los áridos de la curva S-20**

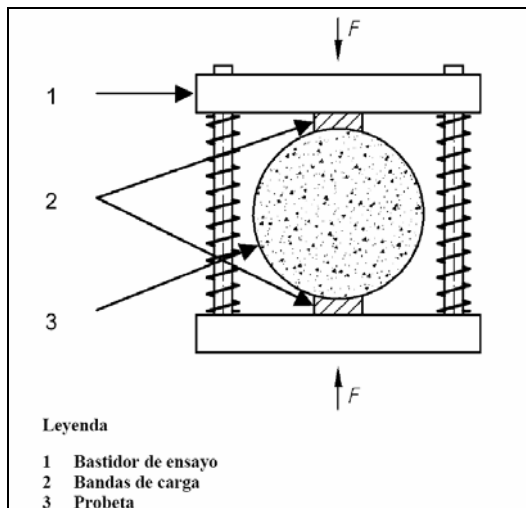
TAMAÑO TAMIZ UNE	Huso S20 inferior	Huso S20 superior	Huso S20 centrado
40			100
25	100	100	100
20	95	80	88
12,5	79	64	72
8	66	50	58
4	50	35	43
2	38	24	31
0,5	21	11	16
0,25	15	7	11
0,125	10	5	8
0,063	7	3	5



**Figura 2. Curva granulométrica S-20. Normativa española (Fomento, 2004)**



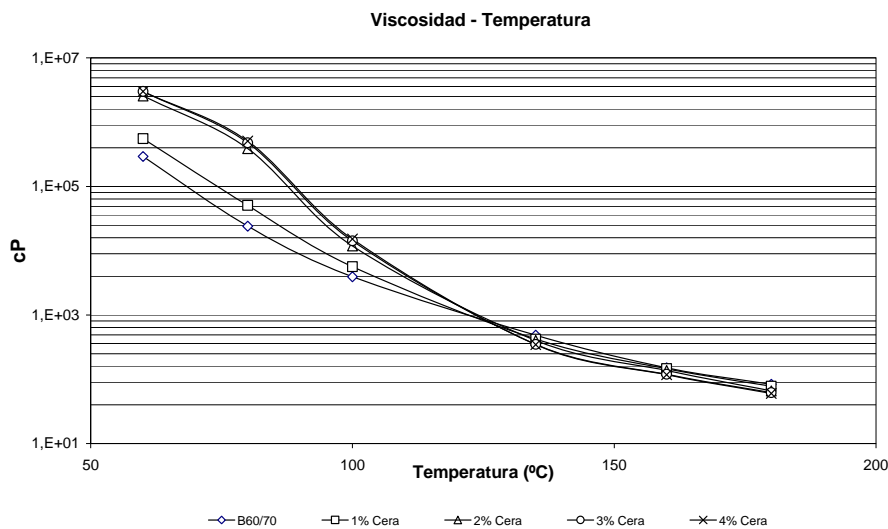
**Figura 3. Diagrama Ensayo Fénix (Pérez, 2009)**



**Figura 4. Diagrama ensayo resistencia a la tracción indirecta**

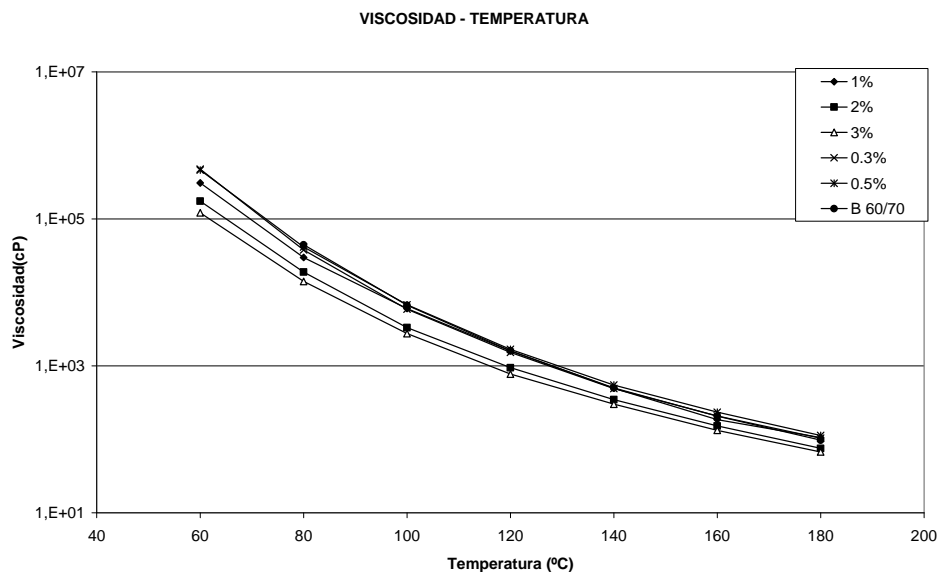
## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

En la primera etapa experimental, se determinó la viscosidad rotacional de los betunes modificados con ceras y tensoactivos a diferentes porcentajes (0,1 al 4%), obteniéndose la influencia de los aditivos con la temperatura y la viscosidad rotacional (Figura 5 y 6).



**Figura 5. Viscosidad rotacional vs temperatura para el betún modificado con ceras**

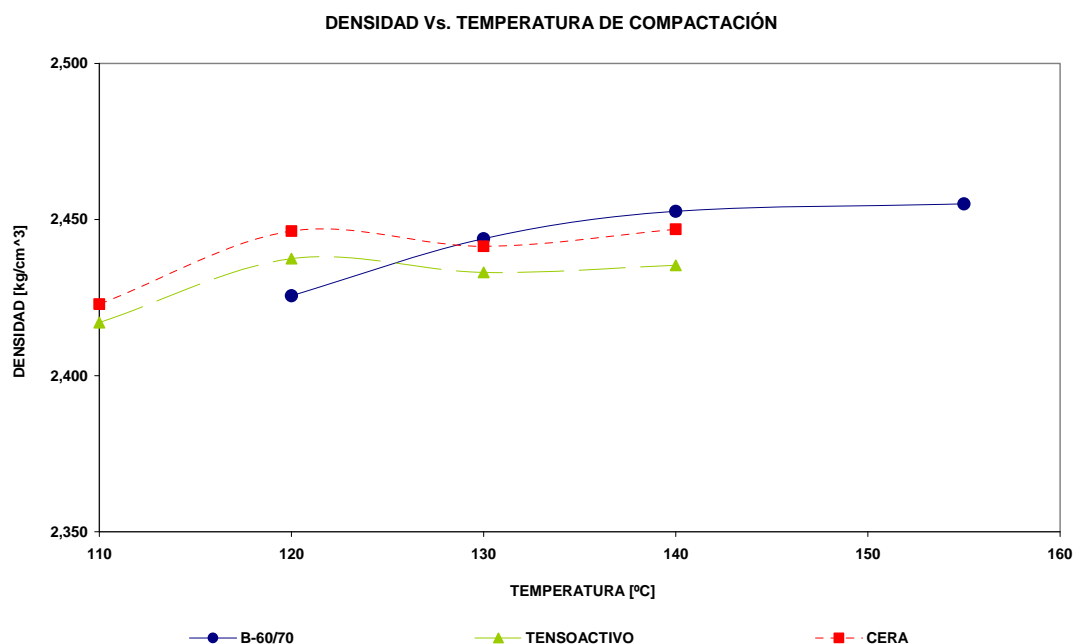
De la figura 5, se observa que la viscosidad de los betunes modificados con ceras, disminuye levemente con respecto al betún B-60/70 para las temperaturas superiores a 130°C. En el caso de temperaturas inferiores a 130°C, los betunes modificados incrementan su viscosidad significativamente, salvo el betún al 1 %, que su comportamiento es muy similar al betún patrón (B-60/70). A la vista de los resultados, se ha seleccionado el betún con el 3% de ceras para ser utilizado en la fabricación de las mezclas semicalientes.



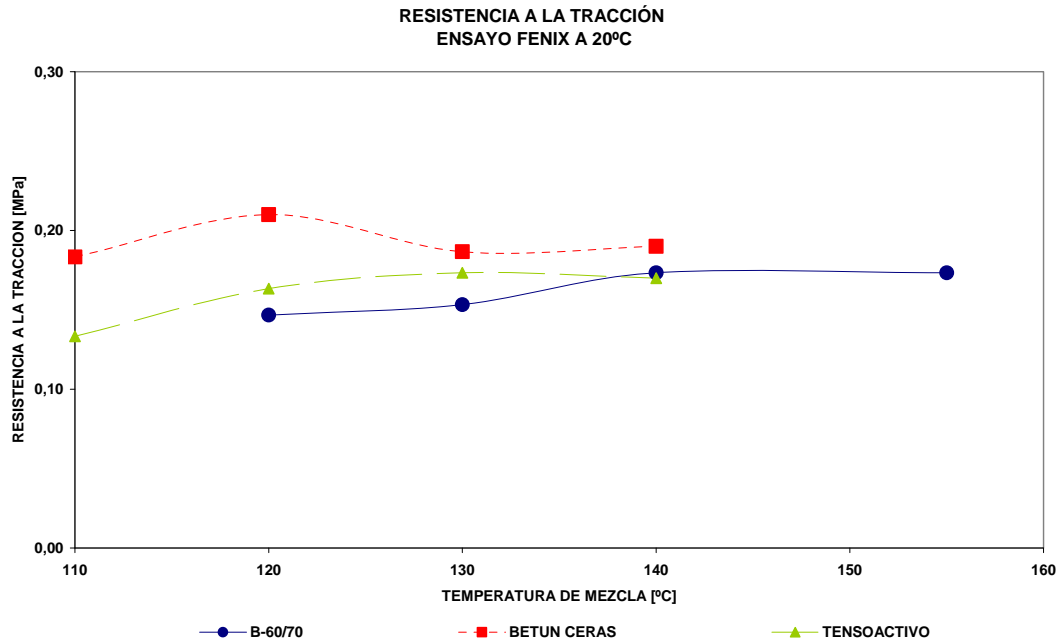
**Figura 6. Viscosidad rotacional vs temperatura para el betún modificado con tensoactivos**

De la figura 6, se aprecia que el tensoactivo actúa como plastificante (disminuyendo la viscosidad del betún) en todo el intervalo de temperaturas estudiado en porcentajes mayores del 0,5%. Es por esto, que para el estudio se modificó el betún B-60/70 al 0,3% de adición de tensoactivo y así no comprometer sus características mecánicas.

Los resultados obtenidos en la segunda etapa experimental, mostraron en primera instancia, la influencia de la temperatura de compactación y el tipo de aditivo utilizado en la densidad de las mezclas estudiadas (Figura 7). Se observa que la densidad de las mezclas disminuye en la medida que la temperatura de compactación disminuye, sin importar el tipo de betún utilizado. Así mismo, que existe un rango de temperaturas donde el cambio de densidad es muy bajo (120-140°C) y por debajo a ese rango, la densidad disminuye sustancialmente.

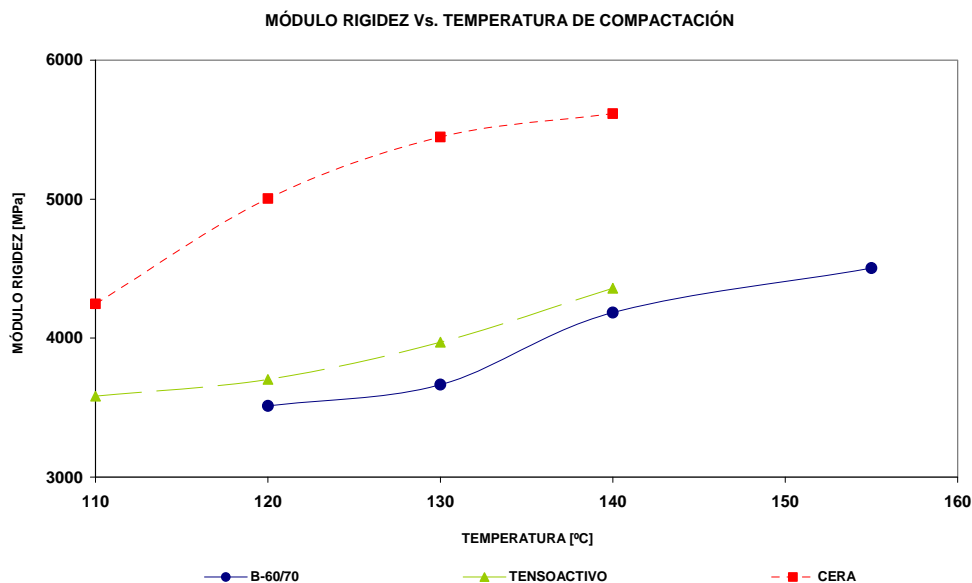


**Figura 7. Densidad de las mezclas semicalientes con al temperatura de compactación**



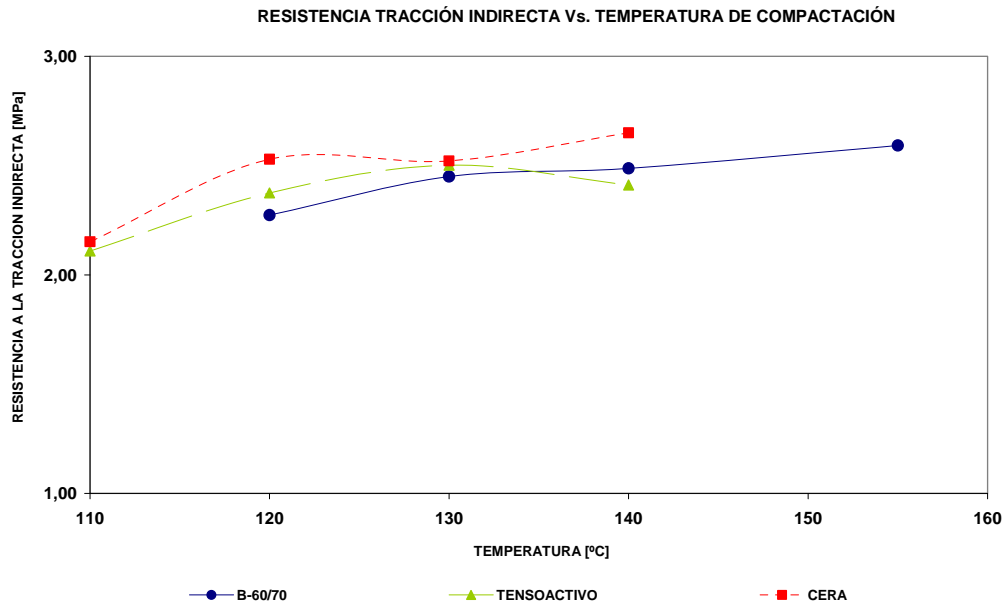
**Figura 8. Resistencia a la tracción directa mediante el Ensayo Fénix**

De la figura 8, resistencia a la tracción directa obtenida del ensayo Fénix, se puede observar que para las diferentes temperaturas de compactación, la mezcla fabricada con el betún modificado con ceras presenta una resistencia mayor que las otras mezclas fabricadas. Se resalta que el valor máximo se obtiene con la mezcla bituminosa fabricada a 120°C y con el betún con adición de ceras. Si se toma como referencia la resistencia de la mezcla caliente fabricada con el betún B-60/70 y compactada a 155°C, se observa que la mezcla con el betún tensoactivo tendría una resistencia equivalente para las temperaturas comprendidas entre 120 y 140°C y en el caso de la mezcla con el betún con adición de ceras, todas las muestras tendrían una resistencia mayor.



**Figura 9. Módulo de rigidez de las mezclas semicalientes y calientes**

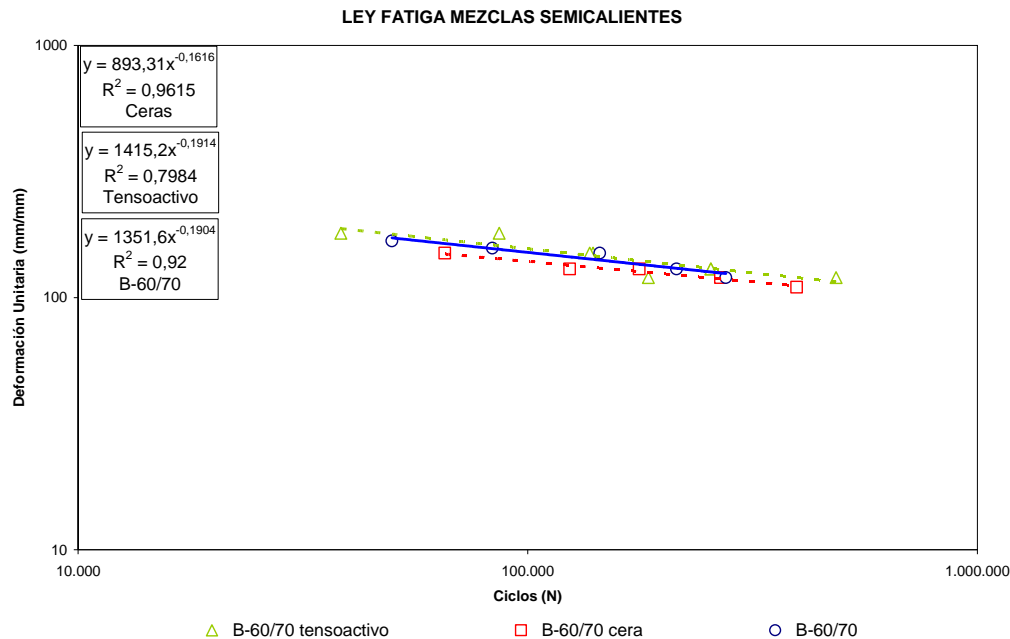
De la figura 9, módulo de rigidez con la temperatura de compactación, se aprecia claramente que las mezclas fabricadas con el betún modificado con ceras, presenta los mayores valores de módulo de rigidez, sin importar la temperatura de compactación y además, sus magnitudes son muy superiores a la mezcla fabricada con el betún B-60/70 y compactada a 155°C (muestra patrón). El comportamiento de la mezcla fabricada con el betún con tensoactivos, muestra que para todas las temperaturas compactadas, el módulo de rigidez es similar al de la muestra patrón.



**Figura 10. Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas semicalientes y calientes**

De la figura 10, resistencia a la tracción indirecta con la temperatura de compactación, se puede observar que para las temperaturas comprendidas entre 120 y 140°C, las mezclas fabricadas con el betún modificado con ceras, presentan una resistencia mayor con respecto a las otras mezclas (betún B-60/70 y tensoactivos). En el caso de la mezcla fabricada con el betún modificado con tensoactivos, la resistencia es un poco inferior a la muestra patrón. Para la temperatura de compactación de 110°C, la resistencia de las mezclas fabricadas con betún modificado es significativamente inferior que la muestra patrón (Betún B-60/70 y compactado a 155°C).





**Figura 11. Leyes de fatiga de las mezclas semicalientes y calientes**

Por último, de la figura 11, resistencia a la fatiga de las mezclas bituminosas, se puede observar que las pendientes de las tres mezclas son relativamente similares, apreciándose una pendiente levemente menor para la mezcla modificada con ceras. Si se analiza la deformación al millón de ciclos para las mezclas estudiadas, se podría manifestar que todas tienen aproximadamente el mismo valor, lo cual pone de manifiesto, que el comportamiento a fatiga de las tres mezclas estudiadas es muy similar.

## CONCLUSIONES

Del estudio comparativo del comportamiento de las mezclas calientes y semicalientes fabricadas y compactadas con diferentes betunes y a diferentes temperaturas, se puede concluir que:

- Modificar el betún B-60/70 con ceras al 3 %, produce un incremento en la resistencia a la tracción directa (Ensayo Fénix) e indirecta de las mezclas semicalientes, especialmente en el rango de temperatura de compactación de 120 a 140°C. Adicionalmente, se observa que sin importar la temperatura de compactación, el módulo de rigidez obtenido es muy superior con respecto a la mezcla patrón. (Betún B-60/70 y compactada a 155°C). De otra parte, se estableció que compactar la mezcla semicaliente por debajo de 110°C, produce un descenso significativo en la magnitud de sus propiedades de resistencia a la tracción indirecta y módulo de rigidez. Por último, en los resultados de las leyes de fatiga (Betún B-60/70 y modificado con ceras), no se observan cambios importantes en su comportamiento, salvo una pendiente levemente menor para la mezcla fabricada con ceras.
- Fabricar y compactar mezclas semicalientes con los betunes modificados con ceras o tensoactivos y a temperaturas entre 120-140°C, permite alcanzar o superar la resistencia obtenida de la mezcla caliente (mezcla patrón).

- Por último, poder fabricar y compactar mezclas semicalientes a temperaturas entre 120-140°C y que tengan un comportamiento similar o mejor que una mezcla bituminosa caliente fabricada y compactada a 155°C, genera la posibilidad de ahorrar significativamente energía en los procesos de fabricación, extendido y compactación de firme. Adicionalmente, se disminuiría la emisión de gases de efecto invernadero en todos los procesos de construcción de una carretera.

## AGRADECIMIENTOS

La realización del Proyecto Fénix ([www.proyectofenix.es](http://www.proyectofenix.es)) ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

Los autores quieren agradecer a todas las organizaciones y empresas participantes del Proyecto Fénix: Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos (CIESM), Centro Zaragoza, Construcciones y Obras Llorente (Collosa), Ditecpesa, Asfaltos y Construcciones Elsan, Intrame, Pavasal, Repsol YPF, Sacyr, Serviá Cantó, Sorigué, CARTIF, CEDEX, CIDAUT, CSIC (IIQAB), GIASA, Intromac, Labein, Universidad de Alcalá de Henares, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Castilla La Mancha, Universidad de Huelva, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad Politécnica de Madrid, y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia están permitiendo el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

## REFERENCIAS

- Bahia, H., Anderos, D. “Glass transition behaviour and physical hardening of asphalt binders”, *Journal Assoc Asphalt Paving Technol* **62**,1993.
- D’Angelo, J., Ham, E., Bartoszek, J., Baumgardier, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jawshidi, M., Jones, W., Newcomb, d., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. “*Warm Mix Asphalt: Europe Practice*”. Technical Report FHWA. Project FHWA-PL-08-007. 2008.
- Gil, S., Amor, j., Felipe, J. Costa, A. Cortes, C., Paez, A., Valor, F., Potti, J. “*Estudio de los aditivos que permiten reducir la viscosidad del ligante a elevadas temperaturas*”. ASEFMA. Madrid, 2009.
- Jenkins, K. “*Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on formed bitumen*”. Doctor Dissertation. Stellenbosch University. 2000.
- Ministerio de fomento. “Secciones de firme: Instrucción de carreteras norma 6.1 IC”. Minsiterio de fomento. 2004.
- Ortiz de la Tabla, R. “*Procedimientos para reducir la contaminación producida por la fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas. Mezclas Semicalientes*”. Escuela superior de ingenieros de Caminos, puertos y canales de Barcelona. Tesina. 2009.
- Pérez, F.E., Valdés, G.A., Botella, R., “Experimental study on resistance to cracking of bituminous mixtures using the Fénix Test”, *7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, 2009.
- Raz, Ramón Tomás. “*Sistemas de fabricación de mezclas semicalientes y templadas*”. ASEFMA. Madrid, 2009.